УДК 621.384.6.539.12.04

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА

В.А. Колчанова

Томский политехнический университет
E-mail: kolchanova_nika@mail.ru

Показана возможность экспериментального определения параметров схемы замещения трансформатора Тесла из осциллограмм опытов холостого хода и обратного холостого хода.

Одним из критериев обеспечения надежного функционирования трансформатора Тесла – ключевого элемента различных электрофизических комплексов для согласования трансформатора с другими устройствами, является контроль и диагностика его параметров [1, 2]. В данной работе предлагается экспериментальное определение параметров схемы замещения трансформатора Тесла из опытов холостого хода и обратного холостого хода.

Рассмотрим алгоритм определения параметров первичной цепи трансформатора Тесла (рис. 1, *а*) на примере модельной задачи. После срабатывания ключа S в режиме холостого хода на первичную обмотку трансформатора с индуктивностью L1, разряжается конденсатор C1, заряженный до напряжения U (рис. 1, *б*).

Решением прямой задачи по расчету колебательного переходного процесса в цепи второго порядка для тока $i_1(t)$ будет выражение вида [1]

$$i_1(t) = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t} = 2 \cdot \left|A_1\right| \cdot e^{-\delta t} \sin(\omega t),$$

где A_1, A_2 – постоянные интегрирования; p_1 и p_2 – комплексно-сопряженные корни характеристического уравнения, которые являются величинами, несущими информацию о параметрах схемы.

Задаем параметрами схемы: R1=0,02 Ом; L1=6 мкГн; C1=8 мкФ; M=0,2 мГн; R2=20 Ом; L2=20 мГн; C2=2,4 нФ; U=50 кВ и, решая характеристическое уравнение, получаем комплексно-сопряженные корни $p_{1,2}=-1666{,}6\pm j144328$ и выражение для тока $i_1(t)=57739\cdot e^{-1666{,}6t}\cdot\sin(144328t)$, А, графическая зависимость которого от времени приведена на рис. 2, *а*.

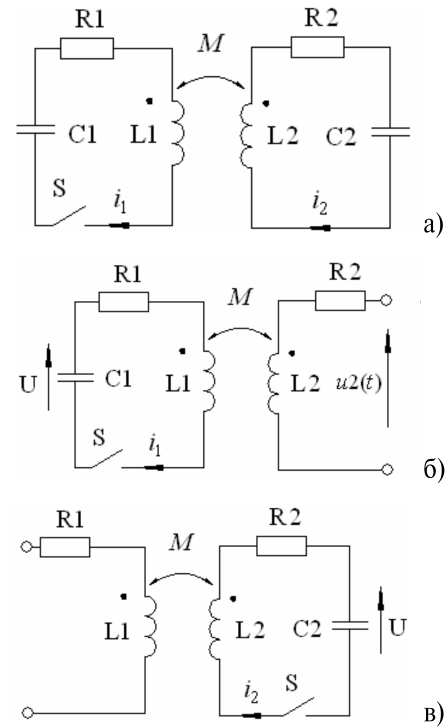


Рис. 1. *Схема замещения трансформатора Тесла в режимах: а) рабочем; б) холостого хода; в) обратного холостого хода*

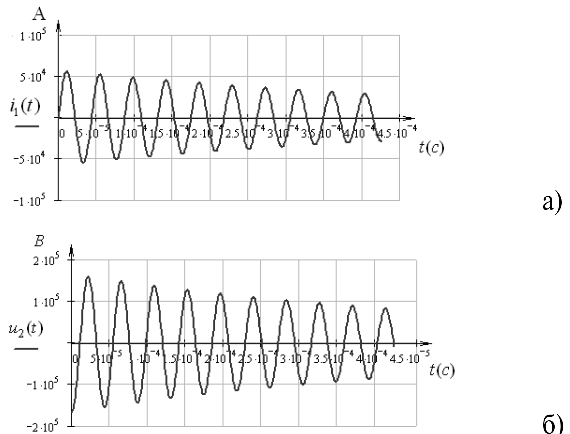


Рис. 2. *Осциллограммы: а) тока $i_1(t)$; б) напряжения $u_2(t)$ в режиме холостого хода*

По известной осциллограмме тока решаем *обратную задачу* определения параметров схемы. Используя систему нелинейной регрессии (1), определяем коэффициенты K_0, K_1, K_2 по графической зависимости рис. 2 [3]:

$$\begin{cases} i_1(t) = K_0 e^{K_1 \cdot t} \cdot \sin(K_2 \cdot t); \\ \dfrac{di_1(t)}{dK_0} = e^{K_1 \cdot t} \cdot \sin(K_2 \cdot t); \\ \dfrac{di_1(t)}{dK_1} = t \cdot K_0 e^{K_1 \cdot t} \cdot \sin(K_2 \cdot t); \\ \dfrac{di_1(t)}{dK_2} = t \cdot K_0 e^{K_1 \cdot t} \cdot \cos(K_2 \cdot t). \end{cases} \quad (1)$$

$$p_{1,2} = -K_1 \pm jK_2 = -1666{,}6 \pm j144328 \ \frac{1}{\text{c}}; \quad (2)$$

$$\text{L1} = \frac{U}{|K_0| \cdot K_2} = 6 \cdot 10^{-6} \ \text{Гн}; \quad (3)$$

$$\text{C1} = \frac{1}{(K_1^2 + K_2^2) \cdot \text{L1}} = \frac{1}{|p| \cdot \text{L1}} = 8 \cdot 10^{-6} \text{Ф}; \quad (4)$$

$$\text{R1} = \sqrt{(\frac{1}{\text{L1} \cdot \text{C1}} - K_2^2) \cdot 4\text{L1}^2} = 0{,}02 \ \text{Ом}. \quad (5)$$

В результате получаем значения для коэффициентов: K_0=5,774·10^4, K_1=δ=–1666,6, K_2=ω=144328. Используя соотношения (2–5), определяем параметры первичной цепи трансформатора.

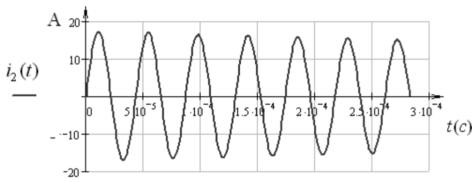


Рис. 3. *Осциллограмма тока $i_2(t)$ в режиме обратного холостого хода*

Для определения параметров вторичной цепи трансформатора Тесла R2, L2, C2 по осциллограмме тока $i_2(t)$ (рис. 3) выполним все предыдущие операции для режима обратного холостого хода (рис. 1, *в*).

В результате получаем значения коэффициентов для тока $i_2(t)$: $K2_0$=17,32; $K2_1$=δ=–500; $K2_2$=ω=1443367 по которым, используя соотношения (6–8) определяем R2, L2, C2.

$$\text{L2} = \frac{U}{|K2_0| \cdot K2_2} = 20 \cdot 10^{-3} \ \text{Гн}; \quad (6)$$

$$\text{C2} = \frac{1}{(K2_1^2 + K2_2^2) \cdot \text{L2}} = \frac{1}{|p| \cdot \text{L2}} = 2{,}4 \cdot 10^{-9} \ \text{Ф}; \quad (7)$$

$$\text{R2} = \sqrt{(\frac{1}{\text{L2} \cdot \text{C2}} - K2_2^2) \cdot 4\text{L2}^2} = 20 \ \text{Ом}. \quad (8)$$

Коэффициент взаимоиндукции M определим из опыта холостого хода по осциллограмме напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Выражение для напряжения на вторичной обмотке:

$$u_2(t) = -M \frac{di_1}{dt} = -M \cdot \left|2 \cdot A_1 \cdot p_1\right| \cdot e^{\delta t} \cdot \cos(\omega t). \quad (9)$$

Решением системы уравнений нелинейной регрессии общего вида (10) для функции $u_2(t)$ (9) являются коэффициенты a_0; a_1; a_2 (11), с помощью которых по выражению (12) определяем коэффициент взаимоиндукции M.

$$\begin{cases} u_2(t) = a_0 \cdot \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \cdot e^{a_1 t} \cdot \cos(a_2 t); \\ \dfrac{du_2(t)}{da_0} = \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \cdot e^{a_1 t} \cdot \cos(a_2 t); \\ \dfrac{du_2(t)}{da_1} = a_0 \cdot \cos(a_2 t) \left(\begin{array}{l} \dfrac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}} \cdot e^{a_1 t} + \\ + \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \cdot t \cdot e^{a_1 t} \end{array} \right); \\ \dfrac{du_2(t)}{da_2} = a_0 \cdot e^{a_1 t} \cdot \left(\begin{array}{l} \dfrac{a_2}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}} \cdot \cos(a_2 t) - \\ - \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \cdot t \cdot \sin(a_2 t) \end{array} \right). \end{cases} \quad (10)$$

$$a_0 = 1{,}667 \cdot 10^5; \ a_1 = -1666{,}6; \ a_2 = 144336{,}7 \quad (11)$$

$$M = \frac{-a_0 \cdot a_2 \cdot \text{L1}}{U} = \frac{-a_0 \cdot K_2 \cdot \text{L1}}{U} = 2 \cdot 10^{-4} \ \text{Гн}. \quad (12)$$

Полученные значения согласуются с модельными параметрами схемы. Таким образом, на примере модельной задачи доказана эффективность данного алгоритма и возможность его применения для контроля и диагностики трансформатора Тесла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зевеке П.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
2. Вассерман С.Б. Трансформатор Тесла в высоковольтных ускорителях заряженных частиц. – Новосибирск: Препринт ИЯФ 77-110, 1977. – 43 с.
3. Дьяконов В.П. Mathcad 8/2000: Специальный справочник. – СПб.: Изд-во "Питер", 2000. – 592 с.